

Warszawa, 18 lipca 2025

Prof. dr hab. inż. Janusz Kacprzyk, dr h.c. mult.
Członek rzeczywisty PAN
Fellow of IEEE (Life), IET, EurAI, AAAIA, AIIA, IFIP, IAITQM, IFSA, SMIA
Instytut Badań Systemowych
Polska Akademii Nauk
Ul. Newelska 6
01-447 Warszawa
Email: kacprzyk@ibspan.waw.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Jana Kwiatkowskiego
pt. „Sprzętowa implementacja algorytmów korekcji niejednorodności matryc bolometrycznych
o wysokiej rozdzielczości”**

Niniejsza recenzja została przygotowana w odpowiedzi na prośbę p. prof. dr. hab. inż. Andrzeja Polańskiego, Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Śląskiej w Gliwicach, o wykonanie recenzji ww. rozprawy doktorskiej, wyrażoną w piśmie z dn. 28 maja 2025 r.

Przy przygotowywaniu recenzji wezmę przede wszystkim pod uwagę odpowiednie wymagania ustawowe dotyczące recenzji rozpraw doktorskich, wyrażone – co przytoczono w powyższym piśmie – w art. 187, ust. 1 i 2 Ustawy Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z dn. 20 lipca 2020 r.

Chciałbym na początek od razu stwierdzić, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia te ogólne wymagania formalne, jak też i inne, zawarte w stosownych aktach prawnych, ale też inne, mniej formalne wymagania stawiane zwyczajowo rozprawom doktorskim w polskim środowisku naukowym.

Ponadto, chciałbym stwierdzić, że nie zachodzą żadne okoliczności typu konfliktu interesów, które mogłyby wywoływać jakiegokolwiek wątpliwości co do mojej bezstronności przy sporządzaniu niniejszej recenzji.

Pierwszym pytaniem, jakie warto sobie zadać przy recenzowaniu rozpraw doktorskich, jest: czego praca dotyczy. W naszym przypadku rozprawa dotyczy ogólnie cyfrowej reprezentacji obrazów przedstawiających otoczenie, czyli to, co np. znajduje się wokół nas, najczęściej – ale nie zawsze – to, co jako ludzie widzimy. Jest to oczywiście bardzo ważne dla każdego rodzaju działalności ludzkiej, w szczególności mającej na celu podjęcie jakichś decyzji czy dokonanie jakich wyborów, na czym właściwie polega praktycznie cała działalność człowieka i innych istot żywych, a jest też modelowane w zachowaniach agentów software’owych i hardware’owych.

Ponieważ większość rozwiązań stosowanych w technice w sposób mniej lub więcej jawny odzwierciedla zachowanie człowieka – w sensie jednostki, grupy, a nawet społeczeństwa – więc czynności i procesy, które udgrywają kluczową rolę w powyższej działalności człowieka, są także inspiracją rozwiązań technicznych. Reprezentacja obrazów jest tu bardzo dobrym przykładem, bo we wszystkich zadaniach powyższego typu musimy wziąć pod uwagę otoczenia, które trzeba rozpoznać, dokonać jego odpowiedniej reprezentacji, tak żeby można było je przekształcać. Oczywiście, w naszym kontekście dokonać tego trzeba w sposób cyfrowy.

W niniejszej pracy rozpatruje się ważną klasę zadań powyższego typu, a mianowicie cyfrową reprezentację obrazów, ale nie w zakresie widma widzialnego dla człowieka, tylko promieniowania elektromagnetycznego spoza zakresu światła widzialnego, czyli np. podczerwieni, ultrafioletu,

promieni rentgenowskich czy fal radiowych. Reprezentacja obrazów w widmie niewidzialnym ma wielkie znaczenie w nauce i technice, pozwala ona na lepsze i pełniejsze zrozumienie otaczającego świata, którego jako ludzie nie widzimy, ale poprzez tę reprezentację w widmie niewidzialnym możemy uzyskać wgląd w wiele aspektów rozpatrywanego problemu, a przez to bardziej efektywnie i sprawnie go zrozumieć i rozwiązać.

A zatem, najgólniej biorąc, praca dotyczy bardzo ważnego zagadnienia reprezentacji, a potem przetwarzania, obrazów w widmie niewidzialnym, co ma wielkie znaczenia w wielu istotnych zastosowaniach.

W pracy rozpatruje się naturalne i bardzo ogólne rozwiązanie reprezentacji otoczenia w widmie niewidzialnym w postaci obrazów cyfrowych z użyciem matryc sensorów, umieszczonych np. w kamerach. Jest oczywiste, że te kamery powinny umożliwiać uzyskanie najwyższej możliwej jakości, rozumianej zwykle w sensie wysokiej rozdzielczości matrycy i wysokiej czułości składających się na nią sensorów.

Obiektem zainteresowania w pracy jest przypadek matryc bolometrycznych, czyli najgólniej takich, które pozwalają na pomiar energii przenoszonej przez promieniowanie w możliwie szerokim zakresie długości fal. Są to detektory termiczne zmieniający energię promieniowania elektromagnetycznego na ciepło, które zmienia temperaturę elementu pomiarowego, co z kolei można zmierzyć bez problemu. A zatem, matryce bolometryczne są kluczowym elementem reprezentacji obrazów w widmie niewidzialnym. Rejestracja obrazu w widmie niewidzialnym z wykorzystaniem matryc bolometrów jest zwana termowizją i znajduje bardzo wiele zastosowań praktycznych, gdy chcemy np. reprezentować obrazy widziane w podczerwieni, co ma wiele zastosowań w technologiach cywilnych i wojskowych.

Jest oczywiste, że obrazy uzyskane z matryc bolometrycznych są obarczone zakłóceniami, m.in. wynikającymi z nieidentycznych charakterystyk odpowiedzi mikrobolometrów, z których zbudowana jest matryca bolometryczna, oraz zakłóceń toru pomiarowego matrycy. Ma to oczywiście negatywny wpływ na jednorodność i jakość obrazu. Wymaga to więc zastosowania odpowiednich korekcji algorytmicznych, a potem ewentualnie ich implementacji sprzętowych, jak w rozprawie. W pracy przyjęto sprzętową implementację dedykowanego algorytmu korekcji niejednorodności służącego do korekcji obrazów termowizyjnych uzyskanych z użyciem dość typowej, niechłodzonej matrycy bolometrycznej, ale o dużej rozdzielczości 1024x768 pikseli.

Podsumowując te krótkie uwagi na temat obrazów w widmie niewidzialnym i ich reprezentacji, rejestracji, analizy, a potem przetwarzania, bez wątpienia jest to bardzo ważne zagadnienie o wielkim znaczeniu teoretycznym i praktycznym, odgrywającym wielką rolę w szeregu zastosowań cywilnych i wojskowych. Występują w nim zarówno wyzwania algorytmiczne, związane z opracowaniem efektywnych algorytmów korekcji, ale potem także wyzwania implementacyjne, tu w postaci sprzętowej.

Nie mam więc wątpliwości, że:

- Rozpatrywany w pracy problem należy do nauk inżynierjno-technicznych, do dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja,
- Problem jest ważny, ponieważ zawiera wyzwania badawcze, teoretyczne, związane z koniecznością zbudowania efektywnych algorytmów korekcji,
- Problem zwiera też wyzwania implementacyjne i konstrukcyjne, w najlepszym duchu i tradycji nauk inżynierjno-technicznych.

Nie mam więc żadnych wątpliwości co do właściwego zaklasyfikowania doktoratu do odpowiedniej dyscypliny, a także do trafnego wyboru tematyki i zakresu.

Przejdę teraz do omówienia i oceny kolejnych rozdziałów i podrozdziałów pracy, co pozwoli na najbardziej właściwą ocenę rozprawy i jej niewątpliwych zalet.

Rozdział 1 „Wstęp” jest w zasadzie poświęcony najpierw temu, co zostało podane powyżej, a więc ogólnemu przedstawieniu problemu reprezentacji obserwowanego otoczenia w postaci obrazu cyfrowego jako jednemu z podstawowych elementów w wielu zagadnieniach naukowych i technologicznych. Kandydat koncentruje się na rejestracji otoczenia z wykorzystaniem matryc sensorów, ponieważ punkt ciężkości w rozprawie jest na zastosowania techniczne. Aby wyjść poza standardowe obrazy w widmie widzialnym, Kandydat podaje następnie przekonujące argumenty za ważnością rozpatrywania zagadnień reprezentacji – a potem ich analizy, przetwarzania i implementacji w rzeczywistych układach technicznych – takich obrazów w widmie widzialnym, na obrazy w widmie niewidzialnym, co oczywiście pozwala znacznie zwiększyć zdolności percepcji człowieka na to, czego oko ludzkie nie widzi, poprzez rejestrację fal elektromagnetycznych, których częstotliwości znajdują się poza zakresem widzialnym.

Naturalnym rozwiązaniem jest użycie w kamerze matryc, składających się z wielu sensorów, które mogą być różnego rodzaju, m.in. matryce światłoczułe, działające na zasadzie zjawiska fotoelektrycznego, oraz matryce bolometryczne, działające na zasadzie pomiaru zmian temperatury elementu, na który pada promieniowanie elektromagnetyczne.

W rozprawie Kandydat koncentruje się na matrycach bolometrycznych, które umożliwiają rejestrację fal elektromagnetycznych w szeroko rozumianym spektrum promieniowania podczerwonego, a w szczególności w zakresie tzw. średniej i dalekiej podczerwieni, czyli – odpowiednio – w zakresie długości fal od 2,5 do 25 μm oraz od 25 do 1000 μm . Te zakresy znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i techniki, co także świadczy o dobrym wyborze rozpatrywanego w rozprawie problemu.

Rejestracja obrazu z wykorzystaniem matryc bolometrycznych, zwana termowizją, ma liczne zastosowania, np. w wojsku, medycynie, energetyce itp. Uzyskane termogramy podlegają jednak zakłóceniom, głównie wynikającym z nieidentycznych charakterystyk odpowiedzi mikrobolometrów, wchodzących w skład matrycy, oraz zakłóceń toru pomiarowego matrycy, co powoduje większą niejednorodność obrazu.

Autor zajmuje się więc zagadnieniem korekcji niejednorodności termogramów i proponuje tu nowe, autorskie rozwiązania, które potem implementuje sprzętowo. Bardziej szczegółowo, proponuje i realizuje dedykowany algorytm korekcji termogramów uzyskanych z niechłodzonej matrycy bolometrycznej, o rozdzielczości 1024x768 pikseli. Co ważne, zaproponowane rozwiązanie charakteryzuje się adaptacyjnością polegającą na zmianach parametrów korekcyjnych matrycy jako wyniku zmian w czasie parametrów charakterystyk odpowiedzi sensorów matrycy. Jest to nowoczesne i zaawansowane podejście, zgodne z obecnymi tendencjami w dziedzinie.

Formalnie, Autor formułuje tu:

Tezę 1 Rozprawy:

„Możliwe jest stworzenie i sprzętowa implementacja adaptacyjnego algorytmu, którego zadaniem jest estymacja i korekcja zakłócenia o stałej charakterystyce, występującego w strumieniach wideo, uzyskanych przy pomocy matrycy mikrobolometrycznej o wysokiej rozdzielczości.”

Tezę 2 Rozprawy:

„Możliwa jest realizacja algorytmu korekcji niejednorodności według Tezy 1, realizowanego w czasie zbliżonym do rzeczywistego, determinowanym szybkością akwizycji danych pomiarowych, dedykowanego dla matryc mikrobolometrycznych o wysokiej rozdzielczości.”

Tezę 3 Rozprawy:

„Możliwa jest sprzętowa implementacja adaptacyjnego algorytmu korekcji niejednorodności według Tez 1 i 2, pozwalającego na uwzględnienie nieliniowości charakterystyk odpowiedzi mikrobolometrów, wchodzących w skład matrycy mikrobolometrycznej o wysokiej rozdzielczości, na radiację podczerwoną, emitowaną przez obiekty w obserwowanej scenie.”

Niewątpliwie, te 3 tezy stanowią ambitne i trudne wyzwanie. Zostały one w pracy zrealizowane, co zostanie pokazane w dalszej części recenzji.

Rozdział 2 „Przegląd literatury” jest drugim rozdziałem rozprawy. Jest on bardzo ważny, ponieważ – po pierwsze – znajomość nowoczesnej literatury jest bardzo ważnym warunkiem powodzenia w przypadku rozpraw dotyczących takich nowych wyzwań naukowych i technicznych, a do tego jest też ważnym elementem oceny doktoranta.

Ten przegląd literatury jest niezwykle istotną częścią rozprawy. Po pierwsze, dziedzina nauki i techniki, w której Kandydat pracuje, jest bardzo duża i wiele ośrodków i osób na całym świecie się nią zajmuje, m.in. ze względu na ważność tych zagadnień, w sensie wyzwań naukowych i technicznych. Nic więc dziwnego, że zaproponowano dziesiątki podejść, metod, algorytmów itp., przetestowano je na dziesiątkach problemów testowych i rzeczywistych, otrzymując różne wyniki. Trzeba też wziąć pod uwagę, że zadania były rozpatrywane dla różnych problemów teoretycznych i praktycznych. Przegląd literatury w takim przypadku jest sam w sobie rzeczą niełatwą i wymaga bardzo dobrej orientacji doktoranta w temacie oraz znajomości literatury. Kandydat poradził sobie z tym bardzo dobrze.

Najgólniej biorąc, przegląd dotyczy problemu korekcji niejednorodności matryc bolometrycznych. Na początek podano informacje o charakterze bardziej ogólnych, które mogą być dobrym punktem wyjścia do dalszych rozważań w pracy. Co ważne ze względu na specyfikę rozprawy, szczególną uwagę zwrócono na znane sprzętowe realizacje opisywanych metod, co pozwoliło oczywiście Autorowi zaproponować swoje rozwiązanie. Jednocześnie, w tych rozwiązaniach sprzętowych, Kandydat zaimplementował swoje oryginalne metody i algorytmy.

Na początek, aby zapewnić punkt wyjścia, rozpatrzono krótko przyczyny powstawania niejednorodności obrazu, wynikającej z błędów pochodzących od mikrobolometrów tworzących matrycę. Autor analizuje techniczne i materiałowe aspekty konstrukcji bolometrów, np. związane z nanoszeniem warstw półprzewodników: arsenku indu i antymonku galu, ale nie wnika w zagadnienia materiałowe, które nie dotyczą tej rozprawy.

Ważne dla pracy jest tu założenie, że charakterystyka odpowiedzi bolometru jest przybliżana funkcją liniową, co jest tu – jak też w bardzo wielu zagadnieniach naukowych i technicznych – dobrym rozwiązaniem, prostym i dostatecznie efektywnym. Ale, charakterystyki odpowiedzi pojedynczych mikrobolometrów w matrycy mogą się różnić między sobą, co pociąga za sobą niejednorodność w obrazie, a to może też być zwiększone przez dryft temperaturowy parametrów charakterystyk odpowiedzi mikrobolometrów. Ponadto, mogą występować tu inne negatywne efekty. Autor także dokonał dobrego przeglądu dotyczącego wprowadzenia nieliniowości do powyższych charakterystyk, co oczywiście znacznie utrudnia ich analizę i implementację. To ważna i dobrze wykonana część pracy.

Oczywiście, naturalną konsekwencją występowania powyższej niejednorodności jest też pojawienie się w literaturze bardzo wielu propozycji metod korekcji niejednorodności termogramów. Autor wykazał się tu bardzo dobrą orientacją w literaturze, zarówno w sensie głównych klas metod, jak też konkretnych rozwiązań, a nawet trendów, zwłaszcza dla przypadku matryc dla podczerwieni. Podał bardzo poglądowe klasyfikacje tych metod w atrakcyjnej postaci schematów blokowych i drzew decyzyjnych.

Jest to robione bardzo dobrze, a także ten przegląd zawiera uwagi na temat nowych podejść, które są oparte na głębokim uczeniu, zwłaszcza głębokich sieciach neuronowych. To cenne uwagi na temat

najprawdopodobniej rozwiązań przyszłościowych. Może dobrze byłoby te uwagi rozszerzyć, na przykład nieco więcej uwagi poświęcić korekcji opartej na głębokim uczeniu z użyciem autoencoderów czy GAN (ang. Generative Adversarian Network).

Ważnym aspektem tego przeglądu literatury jest także fakt, że dokonano go z wyraźnym naciskiem na uwzględnienie celu pracy, czyli zaproponowaniu metod, które powinny się zakończyć implementacją sprzętową. Jest ona oczywiście utrudniona przez dość ostre wymagania, wynikające z ambitnych tez rozprawy, a mianowicie konieczność:

- Zapewnienie adaptacyjności parametrów korekcyjnych do zmian w czasie parametrów charakterystyk mikrobolometrów matrycy,
- Uzyskanie płynności przetwarzania na poziomie 30 klatek na sekundę, dla termogramów o rozdzielczości 1024x768 pikseli,
- Uwzględnienie nieliniowości charakterystyk odpowiedzi mikrobolometrów.

Autor zajął się w tym przeglądzie implementacjami w postaci rozwiązań sprzętowych z użyciem układów logiki programowalnej typu FPGA (ang. Field Programmable Gate Array), które mogą być konfigurowane przez użytkownika do wykonania różnych funkcji. Jest to bardzo dobre rozwiązanie w rozpatrywanym przypadku.

Analiza niektórych obiecujących rozwiązań jest tu zrobiona dobrze i dostarcza użytecznych wskazówek, np. dotyczących zastosowania w docelowym rozwiązaniu metod pozwalających na minimalizację zużycia pamięci operacyjnej, choć może dobrze byłoby to dodatkowo skomentować.

Stwierdzono też, że wśród przeanalizowanych istniejących rozwiązań sprzętowych nie znaleziono przykładów dla matryc o rozdzielczości równej lub większej niż 1024x768 pikseli, choć wspomina się o matrycy o rozdzielczości 640x512 pikseli w przypadku zastosowania niektórych metod. Warto to skomentować, także w perspektywie rozpatrywanej implementacji sprzętowej.

Ciekawe są też uwagi nt. braku adaptacyjności, wrażliwości na zakłócenia itp. w przypadku niektórych podejść, ale też może dobrze byłoby to też dodatkowo skomentować. Sprawa wstępnej korekcji jest też ciekawym elementem zarówno przeglądu literatury, jak też tego, co jest bardzo uzasadnionym nowym elementem w zaproponowanym rozwiązaniu oryginalnym, które jest przedmiotem Rozdziału 3. To bardzo ciekawy element dorobku zawartego w pracy.

Jeśli chodzi o sprawy bardziej techniczne, to choć a niektórych pracach w literaturze można znaleźć prace zakładające nieliniową charakterystykę odpowiedzi mikrobolometru, to nie ma wzmianek o sprzętowej realizacji tego ogólniejszego podejścia, ogólniejszego niż proste podejście liniowe. Znane są podejścia z kawałkami liniowymi funkcjami reprezentującymi odpowiedzi mikrobolometru. Takie podejście jest istotą oryginalnego podejścia Kandydata i jego implementacji sprzętowej.

Ciekawe jest tu uzasadnienie wyboru w zaproponowanym rozwiązaniu statystycznej metody CR-NUC, ponieważ cechuje się ona adaptacyjnością, niskim zużyciem pamięci i niską złożonością obliczeniową, a do tego pozwala na zastosowanie jej w matrycy o rozdzielczości 1024x768 pikseli. To dobry wybór, a szczegóły podano w dalszej części pracy.

Na koniec, podano też pewne szczegóły techniczne, m.in. że do implementacji sprzętowej użyto układu FPGA, zastosowano języki opisu sprzętu VHDL i Verilog oraz C++. Jest to dobre rozwiązanie, często stosowane i sprawdzone, na pewno ułatwiające implementację, ponieważ stosuje znane i popularne narzędzia.

Rozdział 3 „Proponowane rozwiązanie” to główna oryginalna część pracy, w której przedstawiono nowe podejście do korekcji niejednorodności matryc bolometrycznych, a także jego implementację

sprzętową. Oczywiście, w podejściu tym spełniono podstawowe założenia projektowe przyjęte w rozprawie, czyli:

- adaptacyjność parametrów korekcyjnych do zmian w czasie parametrów charakterystyk mikrobolometrów matrycy,
- przepustowość danych co najmniej 30 klatek na sekundę dla termogramów o rozdzielczości 1024x768 pikseli co oznacza minimalną częstotliwość korekcji pikseli 23.59296 MHz,
- nieliniowość charakterystyk odpowiedzi mikrobolometrów.

Jak już wspomniano, są to ambitne założenia, których realizacja nie jest trywiana i zawiera wyzwania analityczne i techniczne.

Ogólnie biorąc zaproponowane w pracy rozwiązanie jest oparte na dwuetapowej korekcji niejednorodności z użyciem trzech komponentów sprzętowych. Po pierwsze, komponent architektury dedykowanego sterownika kamery, służący do korekcji niejednorodności, zwany modułem TEM (ang. Thermogram Enhancement Module) i zawierający dwie metody korekcji. Najpierw usuwa się zakłócenia kolumn wynikające z toru pomiarowego matrycy, stosując autorską metodę z klasy SNUC (ang. Stripe Non-Uniformity Correction), a potem dokonuje się sprzętowej korekcji niejednorodności z użyciem nieliniowej adaptacji statystycznej metody CR-NUC, też opisaną w Rozdziale 2. Są to oryginalne rozwiązania, będące oryginalnymi adaptacjami znanych metod. Rozwiązania te zaimplementowano stosując układ FPGA, co jest uzasadnione.

To oryginalne rozwiązanie ma na celu adaptacyjną poprawę jakości uzyskanych termogramów, przy czym poddano minimalizacji zużycie pamięci RAM (ang. Random Access Memory), która jest potrzebna ze względu na ograniczenia układów FPGA. Bez wątpienia, zaproponowane w pracy rozwiązanie jest oryginalne i obiecujące.

Jeśli chodzi o algorytmikę, to w zakresie korekcji zakłóceń kolumn, przyjęto upraszczające założenia, że zakłócenie jest jednakowe dla wszystkich pikseli w kolumnie, a radiacja, padająca na sąsiednie kolumny matrycy jest mniej więcej równa. Mam to duży sens.

Zakładając poprawnie skalibrowaną matrycę, wartość oczekiwana różnicy odczytów sąsiednich pikseli spośród sąsiednich kolumn w rozpatrywanym obrazie powinna być oczywiście idealnie równa zero, co jest bez wątpienia idealizacją, ale zapewnia prostotę i jak się potem okazuje, daje dobre wyniki. Technicznie, pierwsza kolumna obrazu jest przyjmowana jako wzorcowa i nie podlega korekcji.

Ta procedura została przez Autora w oryginalny sposób zaimplementowana w postaci tzw. maszyny stanu komponentu sprzętowego o dwu stanach: bezczynności (IDLE) i korekcji (NUC). Przechowywane są oczywiście dla każdej z kolumn informacje o 1024 wartościach oczekiwanych. Technicznie jest to realizowane z użyciem wbudowanej w układ FPGA pamięci BRAM (ang. Block RAM), a wartości oczekiwane pikseli w kolumnie są uzyskiwane z wykorzystaniem dolnoprzepustowego filtra IIR (ang. Infinite Impulse Response), z oknem, malejącym w sposób eksponencjalny.

Jest to dobre rozwiązanie, zawierające niewątpliwie oryginalne założenia i ich realizację, a jednocześnie dość łatwo implementowalne technicznie z użyciem założonych elementów sprzętowych.

Po korekcji zakłóceń kolumn, Kandydat proponuje autorskie rozwiązanie następnego ważnego elementu zadania jakim jest korekcja tej niejednorodności, ale już z uwzględnieniem nieliniowości charakterystyk mikrobolometrów. Jest to oczywisty krok w kierunku większej adekwatności proponowanych modeli poprzez odejście od prostej, ale często niedostatecznie dobrze oddającej rzeczywistość, reprezentacji liniowej poprzez założenie reprezentacji nieliniowej. Ten kierunek rozwoju zaproponowanego w pracy rozwiązania jest niewątpliwie uzasadniony i celny, choć oczywiście wprowadzanie wszelkiej nieliniowości może znacznie komplikować analizę

i implementację, a więc – jak to ma zresztą miejsce w większości przypadków rozpatrywanych w nauce i technice – trzeba umiejętnie wybrać, „jak bardzo nieliniowe” ma być przybliżenie rzeczywistej, zwykle silnej nieliniowości, aby jednak uzyskać efektywność numeryczną.

Autor tu zakłada, że:

- zakłócenia pomiarowe są eliminowane poprzez korekcję zakłóceń kolumn,
- zmienności wzmocnienia i błędu zera sensora są znacznie mniejsze niż zmienność promieniowania padającego na sensor, a więc można przyjąć założenie upraszczające, że w przypadku krótkich czasów próbkowania (do kilku minut) ich wartości nie zmieniają się w czasie próbkowania,
- promieniowanie, padające na sensor, jest zmienną losową o rozkładzie jednostajnym,
- charakterystyka odpowiedzi mikrobolometru jest monotoniczna dla mierzonego zakresu wartości promieniowania.

Są to rozsądne założenia, dość dobrze odpowiadające temu, co występuje w rzeczywistych systemach, i powinny prowadzić do dobrych wyników.

Ponadto, dla reprezentacji nieliniowości charakterystyki mikrobolometru, przyjęto kawałkami (częściowo) liniowy model. Jest to bardzo dobre rozwiązanie, zapewniające zarówno dostatecznie dobrą reprezentację nieliniowości, poprzez jej przybliżoną, ale prostą (najprostszą?) reprezentację, jak też dostatecznie dobrą efektywność numeryczną wszelkich metod i algorytmów, w których taką reprezentację się zastosuje.

Parametry poszczególnych liniowych fragmentów charakterystyk (wzmocnienia i błędów zera) są wyznaczane z wykorzystaniem metody CR-NUC (ang. Constant Range Non-Uniformity Correction), nie wymagającej znajomości promieniowania, padającego na sensor. To też dobre rozwiązania, zresztą w literaturze są doniesienia o dobrych wynikach w podobnych zadaniach.

Zarówno przyjęcie tej prostej kawałkami liniowej reprezentacji charakterystyk mikrobolometru, jak też propozycja zastosowania metody CR-NUC do określania parametrów poszczególnych części kawałkami liniowych charakterystyk mikrobolometrów, jest niewątpliwie oryginalnym wkładem Kandydata, który jednocześnie świadczy o Jego dobrej znajomości nowej literatury.

Po zaproponowaniu powyższych oryginalnych rozwiązań, Kandydat idzie dalej, starając się rozwiązać problem polegający na tym, że w przyjętym modelu kawałkami liniowym określić trzeba ograniczenia przedziałów charakterystyki promieniowania padającego na sensory, co w metodzie CR-NUC sprowadza się praktycznie do określenia procentu charakterystyki, którą pokrywa każdy przedział.

Autor zaproponował tu oryginalną metodę, która jest oparta na elementach znanych podejść, ale zawiera też element oryginalności. Implementacja jest ogólnie biorąc oparta o dwie równoległe działające maszyny stanu i dwie pamięci operacyjne BRAM (ang. Block Random Access Memory), z których w każdej klatce obrazu jedna służy do zliczania pikseli, wpadających w histogram klatki, co jest dokonywane przez pierwszą maszynę stanu. Druga pamięć służy do agregacji wartości wyznaczonego w poprzedniej klatce histogramu w celu wyznaczenia granic przedziałów kawałkami liniowej charakterystyki mikrobolometrów, co jest dokonywane przez drugą maszynę stanu.

Jest to rozwiązanie dość proste i naturalne koncepcyjnie, a do tego implementowalne w dość prosty sposób. Opis implementacji sprzętowej jest dobrze opisany w Rozdziale 3, a szczegóły techniczne pominiemy.

Ważnym elementem jest tu natomiast korekcja niejednorodności nieliniowych charakterystyk odpowiedzi mikrobolometrów w macierzy, co dokonuje się poprzez aktualizację parametrów statystycznych wyznaczanych z użyciem metody CR-NUC (ang. Constant Range Non-Uniformity

Correction), której istota jest opisana w Rozdziale 2. Oczywiście, zaproponowano oryginalną adaptację nieliniową metody korekcji niejednorodności.

W tym miejscu Autor zauważa celnie, że ilość danych, wynikająca z rozmiaru matrycy, przekracza pojemność wbudowanych pamięci BRAM (ang. Block Random Access Memory), co implikuje konieczność użycie zewnętrznej pamięci RAM (ang. Random Access Memory).

A zatem, w Rozdziale 3 przedstawiono autorskie rozwiązania, najpierw algorytmiczne, a potem sprzętowe, podstawowego problemu, stanowiącego przedmiot pracy oraz rozwiązanego i zaimplementowanego w postaci autorskich, oryginalnych rozwiązań. A mianowicie, chodzi o nowe podejście do korekcji niejednorodności matrycy bolometrycznej z użyciem nieliniowości charakterystyk. Założono tu, że nieliniowość jest w prostej postaci, dana jako funkcja kawałkami liniowa, co – jak wynika z doświadczeń z bardzo wielu zastosowań w bardzo wielu dziedzinach nauki i techniki – jest bardzo dobrym przybliżeniem zwykle dużo bardziej złożonej nieliniowości, a jednocześnie zapewnia prostotę obliczeniową, a potem implementacyjną.

Przyjęte w tych autorskich propozycjach rozwiązania sprzętowe są dobre, dostatecznie proste, a do tego łatwo implementowalne.

Rozdział 4 „Badania doświadczalne”, to obszerne i dokładne omówienie wyników uzyskanych poprzez użycie zaproponowanych rozwiązań, zarówno algorytmicznych, jak sprzętowych.

Do tego celu zbudowano odpowiednie stanowisko badawcze obejmujące oryginalną, autorską, niechłodzoną kamerę termowizyjną, zaimplementowaną w użyciem układu FPGA i matrycy mikrobolometrycznej o relatywnie wysokiej rozdzielczości 1024x768 pikseli i częstotliwości uzyskanych termogramów 30 klatek na sekundę. Nawiasem mówiąc, skonstruowanie i implementacja tej kamery jest też dużym osiągnięciem konstrukcyjnym Kandydata, co wynikało zresztą z konieczności, ponieważ dostępność kamer termowizyjnych o takich parametrach jest mała, zarówno ze względu na koszty, jak ograniczenia dostępu do zaawansowanych technologii wojskowych.

W tej kamerze jest użyta matryca mikrobolometryczna ULIS UL 05 25 1-026, o rozdzielczości 1024x768 pikseli, a przetwarzanie sygnałów analogowych na cyfrowe jest dokonywane z użyciem 12-bitowego, dwukanałowego przetwornika analogowo-cyfrowego. Charakterystyki mikrobolometrów wchodzących w skład matrycy są uzyskiwane z 786432 sensorów z zastosowaniem analizy statystycznej szeregów czasowych, co stanowi wyzwanie obliczeniowe, zarówno w sensie algorytmicznym, jak sprzętowej realizacji tych obliczeń. W literaturze trudno znaleźć podobne rozwiązania dla matryc o tak dużej rozdzielczości. Rozwiązanie Kandydata jest tu niewątpliwie oryginalne. Ogólnie, w tym rozwiązaniu cały proces wstępnej korekcji obrazu jest dokonywany przez układ sterownika matrycy bolometrycznej w kamerze, realizowany w postaci układu FPGA, a przekazywanie uzyskanej informacji do urządzenia odbiorczego jest z użyciem interfejsu Gigabit Ethernet. Pozwala to na sprzętową akcelerację wybranego algorytmu korekcji niejednorodności, a przez implementację modułu w ramach sterownika matrycy uzyskuje się korekcję już na etapie przetwarzania wstępnego dla każdego z mikrobolometrów.

Jak już wspomniano, w rozprawie zaprezentowano w szczególności implementację, obejmującą:

- redukcję zakłóceń kolumn (ang. destriping),
- korekcję niejednorodności spowodowaną nieidentycznością charakterystyk odpowiedzi wszystkich mikrobolometrów matrycy.

Kandydat przedstawia kolejno różne wyniki działania zaproponowanych przez siebie metod algorytmicznych zaimplementowanych potem sprzętowo. Wśród rozpatrywanych tu wyników dotyczących różnych aspektów, należy wspomnieć przede wszystkim dotyczące:

- korekcji zakłóceń kolumn,

- wzorcowania matrycy,
- wpływu ilości i jakości danych statystycznych,
- różnych implementacji metody CR-NUC,
- efektów korekcji niejednorodności.

Wszystkie analizy otrzymanych wyników dotyczących powyższych aspektów zostały dobrze przebadane, poglądowo przedstawione, m.in. poprzez użycie tabel, grafiki i kolorów, a także właściwie skomentowane.

Ocena tego rozdziału jest bardzo pozytywna, przede wszystkim ze względu na potwierdzenie dobrymi wynikami słuszności przyjętego nowatorskiego rozwiązania, ale też przyjęcie bardzo atrakcyjnej formy prezentacji wyników.

Rozdział 5, „Podsumowanie” jest bardzo zwięzłym, ale dobrym podsumowaniem tego, co Kandydatowi udało się osiągnąć, zwłaszcza w sensie oryginalności swoich autorskich rozwiązań. Jest tu też nawiązanie do zrealizowania trzech tez rozprawy, a także uwagi na temat przyszłych badań.

Jak już wspomniano, jednym z głównych celów rozprawy było opracowanie algorytmu korekcji niejednorodności dla termogramów z niechłodzonej matrycy bolometrycznej o wysokiej rozdzielczości. Już samo sformułowanie zadania można uznać za ambitne i oryginalne, ponieważ postawiono sobie za zadanie: zapewnienie adaptacyjności zaproponowanej metodologii, zachowanie wysokiej wydajności przetwarzania danych oraz uwzględnienie nieliniowości (choć w prostej postaci) charakterystyk mikrobolometrów. Ciekawym wynikiem było też niewątpliwie pokazanie, że celowa może być wstępna eliminacja zakłóceń kolumn matrycy.

Oryginalnym wkładem było niewątpliwie zaproponowanie metody NCR-NUC pozwalającej uwzględnić nieliniowości charakterystyk mikrobolometrów w matrycy. Przyjęte w pracy proste i efektywne rozwiązanie polegające na wykorzystaniu kawałkami liniowego modelu charakterystyki mikrobolometru jest oryginalne i całkowicie uzasadnione.

W korekcji niejednorodności zastosowano metodę dwuetapową, z etapami obejmującymi:

- redukcję zakłóceń kolumn i
- korekcję niejednorodności.

Wszystkie powyższe nowe rozwiązania algorytmiczne zaimplementowano potem sprzętowo, w bardzo efektywny sposób.

Praca kończy się bogatym wykazem literatury, obejmującym praktycznie wszystkie ważniejsze pozycje związane z tematyką pracy i nowymi podejściami w tym zakresie.

Podsumowując, można stwierdzić, że praca:

- Dotyczy bardzo ważnego z punktu widzenia naukowego i zastosowaniowego problemu zastosowania nowoczesnych narzędzi informatycznych, w sensie zarówno analitycznym i algorytmicznym, ale też i implementacji sprzętowej, w analizie obrazów w widmie niewidzialnym,
- Problem ten stanowi przy tym zarówno wyzwanie badawcze, algorytmiczne, jak też implementacyjne i wdrożeniowe,
- Ponadto, problemy te stanowią wyjątkowy przykład problemów multidyscyplinarnych, na przecięciu nauk o danych, algorytmiki, informatyki, elektroniki itp., co znacznie komplikuje ich rozwiązanie,
- W pracy zaproponowano nowatorskie, oryginalne rozwiązania rozpatrywanych problemów,

ale też autorską modyfikację podejść znanych z literatury,

- Praca jest wyjątkowa w tym sensie, że zawiera zarówno nowe, innowacyjne rozwiązanie koncepcyjne i algorytmiczne, jak też nowatorski projekt systemu oraz jego implementację,
- Otrzymane wyniki w pełni potwierdzają zarówno efektywność podejścia Kandydata, jak ich użyteczność w praktyce,
- Praca jest kompletna w sensie użycia właściwych środków sprzętowych i programowych zarówno w fazie projektowania i implementacji, ale też bardzo umiejętnego połączenia wiedzy z wielu dziedzin.

Kandydat:

- Wykazał się dużą wiedzą w zakresie nowoczesnej literatury przedmiotu i nowych tendencji znanych z literatury, ale też dobrze wybrał tematykę i zakres swojego oryginalnego wkładu badawczego oraz implementacyjnego i konstrukcyjnego,
- Posiada niewątpliwie umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej,

W związku z powyższym, stwierdzam, że – moim zdaniem – **rozprawa spełnia wszelkie wymagania ustawowe i zwyczajowo przyjęte w polskim środowisku naukowym** stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o jej **przyjęcie oraz dopuszczenie do publicznej obrony**.

Jednocześnie, ze względu na wspomniane już zalety pracy, proponowałbym, żeby w przypadku odpowiedniego przebiegu obrony i innych etapów postępowania, a także spełnienia odpowiednich wymagań przyjętych w Politechnice Śląskiej, rozpatrzyć jej **wyróżnienie**.